注:一

- (1) 昭和23年10月17日 近畿地区學協會連合講演會において講演,
原稿受付 昭和24年2月4日.
(2) 正員, 京都大學.
(3) 學生員, 京都大學々生.
(4) H. Neuber, Kerbspannungslehre, Julius Springer, Berlin,

1937.

- (5) (6) たとえば W. Buchmann, Forschung, Bd. 5, p. 36,
(1934).
(7) 本研究第3報において發表の豫定.
(8) 小野正敏, 小野鑑正, 機械學會論文集, 5巻19號, 167ページ,
(昭14-5), 7巻29號, 1-20ページ(昭16-11).

切欠効果に関する研究

(第2報 切欠感度定数について)⁽¹⁾河 本 実⁽²⁾

Researches on the Notch Effect of Materials

(The 2nd Report, On the Notch Sensitivity Factor)

by Minoru KAWAMOTO

Let the form factor be α and the notch factor be β , the author obtained the following relation from the results of experiments:

$$\frac{\beta-1}{\alpha-1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{1}{\rho + c\rho^n}}}$$

where ξ, c and n are constants ($n > 1$). Generally β becomes large as ρ becomes small and reaches to the maximum value at a certain value of ρ and then becomes small and approaches to a definite value. These relations are satisfied with the above equation by an appropriate choice of the values of constants. The constant ξ can be considered to represent the sensitivity of the materials for a notch and is independent of the value of ρ .

1. 緒 言

形状係数 α は切欠の形のみによって定まり材料には無関係であり, 切欠係数 β は切欠の形のみによって定まらず材料によって変化する値である. もちろん切欠係数 β の値さえ定まればその切欠を有する場合の疲れ強さが明らかとなるわけであるが, この値は材料の種類のみならず切欠の形によっても変化する値であるから, β によって切欠効果を表わすときはそこには何らの普遍性もなくただ個々の場合の要求をみたすにとどまっている. しかるに形状係数 α は材料には無関係に切欠の形が与えられれば計算その他により求まる値であるから, これと切欠係数 β との関係を何らか普遍的な式にて表わすことができるならばそれはまことに望ましいことである. かかる意味において, たとえば

$$\beta/\alpha = \eta \quad \dots\dots\dots (1)$$

とおき, この η をもって切欠効果を表わし, かつ η の値を材料による定数とみなし種々の材料につきそれぞれ1より小なるある一定値として与えているものがあるが, これは不合理なことである. 何となれば α

および β は常に1より大でなければならないが, いまかりにきわめて鈍い切欠の場合を考えると α はほとんど1に等しくなるから, もし η を1より小なる一定値とすれば (1) 式より β は1より小となるという矛盾が生ずるからである. そこで

$$(\beta-1)/(\alpha-1) = \eta \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおき, これをもって切欠効果を表わし, これを切欠感度と称することがある. かくすれば (1) 式におけるごとく β が1より小さくなるごとき不合理はなくなり, (1) 式よりはるかに合理的である. したがって以後においては η の値としてはすべて (2) 式によるものを用いることとする.

さてこの η の値が切欠の形に無関係に材料により一定の定数となるかということにつき考えるに, η の値は切欠の深さには無関係な定数となることは第1報において実験結果より既に明らかとなったことである; この意味において η はある程度普遍性をもった定数と言えよう. ただし前報における実験は切欠底の丸味半径 ρ を一定とし, かつその値があまり小さい場合であった. そこで ρ の値が変化した場合にやはり η は定数となるかというに, この場合は η

は定数とならないことは一見して明らかである。何となれば ρ が大きい場合すなわち切欠が鈍い場合 η は 1 より小さいが比較的 1 に近い値をとるのに対し ρ が極端に小さい場合すなわち切欠がきわめて鋭い場合 α は非常に大きい値をとり、したがって η は 0 に非常に近い値をとるべきであるからである。したがって η が ρ のいかなる かん数によって表わされるかということが問題となる。かかる見地より本研究においては切欠の鋭さをいろいろ変えた場合の疲れ試験を行い、 β の値が ρ の値によっていかに変化するかを求め、これより α と β とを ρ の値のいかにかわらない普遍的な関係にて表わし、それより新しい切欠感度定数を提案しようとするものである。

2. 実験材料および試験片

実験に供した材料は極軟鋼、半硬鋼および最硬鋼なる 3 種の炭素鋼および鋳鉄で、その化学成分を第 1 表に示した。実験に際して半硬鋼のみは 850°C にて 30mm 加熱焼なましし、他の 2 種の鋼および鋳鉄はいずれも熱処理することなく実験に供した。第 2 表にこれらの

第 1 表 試験片材料の化学成分 %

種 類	記号	C	Si	Mn	P	S
極 軟 鋼	5695	0.10	0.14	0.50	0.033	0.040
半 硬 鋼	6426	0.34	0.24	0.48	0.016	0.028
最 硬 鋼	982FA	0.51	0.27	0.38	0.023	0.010
鋳 鉄	C244	3.50	1.29	0.12	0.21	0.78

第 2 表 試験片材料の機械的諸性質

種 類	記号	降 伏 点 σ_s kg/mm ²		引張強 さ σ_B kg/mm ²	真破断 力 σ_T kg/mm ²	伸び %	絞り %
		上	下				
極軟鋼	5695	28.3	22.7	38.2	83.4	43.1	167.9
半硬鋼	6426	29.8	28.6	53.1	81.2	31.0	45.1
最硬鋼	982FA	41.9	40.0	69.5	108.2	29.3	45.1
鋳 鉄	C244	—	—	19.2	—	—	—

材料の機械的諸性質を示した。疲れ試験片の形状は第 1 図および第 2 図に示したごときもので、第 1 図は極軟鋼、半硬鋼および鋳鉄に対し第 2 図は最硬鋼に対し使用した。図中に示したごとき切欠底部の丸味半径 ρ の値は極軟鋼および鋳鉄においては 5 種類、半硬鋼においては 4 種類、最硬鋼においては 3 種類に変化させた。なおこれらの切欠試験片に対する実験結果と比較のため行った切欠なき場合に対する実験に用いた試験片はそれぞれ第 1 および 2 図と同様であるが試験部分の直径を極軟鋼、半硬鋼および鋳鉄に対しては 12 mm、最硬鋼に対しては 10 mm の平滑表面とした。

使用した試験機は極軟鋼、半硬鋼および鋳鉄に対し

材 料	ρ
極軟鋼	2.0, 1.0, 0.50, 0.15, 0.085
半硬鋼	1.0, 0.35, 0.09, 0.02
鋳 鉄	1.1, 0.50, 0.34, 0.20, 0.10

第 1 図 疲れ試験片 (西原式)

$\rho = 0.5, 0.15, 0.04$

第 2 図 疲れ試験片 (西原河本式)

ては西原式組合曲げねじり疲れ試験機、最硬鋼に対しては西原河本式組曲げねじり疲れ試験機であって、いずれの材料に対しても両振曲げおよび両振ねじりの 2 種類の実験を行った。

3. 実験結果

実験の結果得られた各場合に対する耐久限度の値ならびにそれより計算される切欠形数 β の値を第 3 表に示した。ただし耐久限度の値は繰返し数 10^7 に対するものである。なお第 3 表には切欠形数 β と比較のため計算より求めた形状係数 α の値をも示した。この α の値は前報に述べた方法により求めたものであって常に β より大きくなっているが、もし α の値を Neuber のノモグラフによって求めるときは β より小さくなる場合が起ってきて不都合となる。なおこのことについては前報においてくわしく述べたとおりである。

次に試験片の切欠なき部分における半径 r の切欠底部丸味半径 ρ に対する比 r/ρ を横軸にとり形状係数 α 並びに以上の実験の結果得られた切欠係数との関係を図示すれば第 3, 4, 5 および 6 図に示したごとなる。

4. 実験結果の考察

1. 切欠係数 β の値について 以上の実験結果を見るにいずれの場合においても β の値は r/ρ の値の増大するに従って最初の中は増大しているがある値にて最大となり再び減少している。次にまずこの理由に

第5図 実験結果 (最硬鋼)

第6図 実験結果 (鑄鉄)

第3図 実験結果 (極軟鋼)

第4図 実験結果 (半硬鋼)

第 3 表 実 験 結 果

材 料	記 号	ρ mm	r/ρ	曲 げ				ね じ り			
				σ_{10}'	σ_{20}'	β	α	τ_{10}	τ_{20}	β	α
極 軟 鋼	5695	∞	0	22.6	—	1.00	1.00	12.0	—	1.00	1.00
		2.00	3.75	—	15.0	1.51	2.13	—	10.5	1.14	1.57
		1.00	7.50	—	15.0	1.51	2.62	—	10.0	1.20	1.81
		0.50	15.00	—	13.0	1.74	3.29	—	9.0	1.34	2.15
		0.15	50.00	—	17.0	1.33	5.21	—	10.5	1.14	3.10
		0.085	88.40	—	17.6	1.28	6.61	—	11.0	1.09	3.80
半 硬 鋼	6426	∞	0	24.4	—	1.00	1.00	14.08	—	1.00	1.00
		1.00	7.5	—	9.4	2.60	2.62	—	8.5	1.66	1.81
		0.35	21.4	—	9.0	2.71	3.76	—	7.3	1.95	2.37
		0.09	83.3	—	10.6	2.30	5.43	—	8.3	1.69	3.71
		0.02	375.0	—	14.0	1.74	12.58	—	10.5	1.34	6.77
最 硬 鋼	982FA	∞	0	32.0	—	1.00	1.00	20.0	—	1.00	1.00
		0.50	14.0	—	10.0	3.20	3.17	—	13.0	1.54	2.09
		0.15	46.6	—	12.4	2.58	5.01	—	11.5	1.74	3.00
		0.04	175.0	—	13.0	2.46	8.83	—	13.5	1.48	4.91
鑄 鉄		∞	0	7.0	—	1.00	1.00	7.0	—	1.00	1.00
		1.10	6.82	—	4.0	1.75	2.54	—	4.5	1.57	1.77
		0.50	15.0	—	3.6	1.95	3.29	—	5.75	1.22	2.24
		0.34	22.0	—	4.0	1.75	3.78	—	7.0	1.00	2.39
		0.20	37.5	—	4.0	1.75	4.65	—	4.5	1.57	2.82
		0.10	75.0	—	4.0	1.75	4.19	—	4.5	1.57	3.62

について考察して見よう。

a. 応力分布状態による影響 材料の破壊の起否は単に応力の最高値のみならずその分布状態によって大いに異なる。すなわち称呼応力と形状係数とより求まる最高応力は切欠底部の表面に生ずるものであって、この応力のみによって破壊の起否が定まるものではない。したがって切欠底部表面よりある微小なる深さまでの応力の平均値をとって破壊の条件を論じようとする考えがかなり古くより行われている。しかし切欠底部における結晶の破壊ということを考えればむしろ切欠底部を中心としたある立体的な微小な範囲内における応力の平均値をとって考えるべきであろうと思う。いずれにしてもかかる考えによるときは切欠がある程度以上鋭くなれば疲れ強度がかえって増大することが容易に説明される。何となれば切欠が鋭くなるほど切欠底部附近の応力の傾斜は大となるためある範囲内の応力の平均値は最高応力の増大するにもかかわらずかえって減て少することが考えられるからである。

b. 加工硬化による影響 材料が繰返し応力を受け疲れが進行する際その疲れ進行の過程においていわゆる加工硬化に似た現象を生ずることは周知の事実である。これをかりに加工硬化と呼ぶこととする。この加工硬化は試験片に切欠の有る無しにかかわらず、またその鋭さのいかににかかわらず、あるいはまた作用する繰返し応力の大小にかかわらず、いやしくも疲れ現象の生じている以上は常に起っていると考えられるものである。しかしもし β の値が α の値に等し

ければ耐久限度において切欠底部に生ずる最大応力は常に一定となるから加工硬化の影響も切欠の有無あるいは鋭さのいかににかかわらず一定となるであろうが、実際は α の値は β の値よりも大きく、かつ切欠の鋭くなるほどその差も大きくなるから、結局切欠の鋭くなるほど加工硬化の影響は大となる。しかして加工硬化は疲れ強度を増大せしめる原因となるから、 β の値は切欠がある程度以上鋭くなれば α の増大にもかかわらずかえって低下する理由が繰返し応力による加工硬化の点よりも説明されるわけである。

2. 切欠係数と形状係数との関係について 次に実験の結果求められた切欠係数 β と形状係数 α との関係をいかなる式で表わせばよいかということについて考えて見よう。まず α と β との間にみたすべきものとして次の諸条件が考えられる。

- (i) β は常に α より小であること。
- (ii) ρ が大きくなるに従って β は α 従って 1 に漸近的に近づくこと。
- (iii) ρ が無限に小さくなるとき β は有限のある一定値となること。
- (iv) ρ が大きくなるに従って β は最初増大し後再び減少すること。

これらの条件をみたすものとして、いま次の式を考える。

$$\frac{\beta-1}{\alpha-1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{1}{\rho + c\rho^n}}} \quad (3)$$

ただし ξ , c および n は 0 より大なる定数とし、かつ $n > 1$ とす。この式が (i) および (ii) の条件を満足することは一見して明らかである。次に (iii) の条件について考える。Neuber によれば切欠が非常に鋭いときはその切欠を浅い切欠とみなしてもまた深い切欠とみなしてもそのときの形状係数は $\sqrt{(1/\rho)}$ に比例している。したがって任意の深さの切欠に対する形状係数 α もまた切欠が鋭いときは $\sqrt{(1/\rho)}$ に比例することは前報における式より明らかである。したがって上式にて ρ が無限に小さくなるとき β は有限のある一定値となり (iii) の条件を満足していることがわかる。最後に (iv) の条件については c および n の値を適当にとることにより β の値は ρ の小さくなるに従って最初増大し後再び減少することとなる。したがって (3) 式は上記の 4 条件をことごとく満足している⁽³⁾。

第 4 表 各定数の値

材 料	応力の種類	c	n	ξ
極 軟 鋼	曲 げ	500	2	0.03
	ね じ り	"	"	0.02
半 硬 鋼	曲 げ	"	3	0.5
	ね じ り	"	"	0.5
最 硬 鋼	曲 げ	"	"	0.8
	ね じ り	"	"	0.4
鋳 鉄	曲 げ	"	2	0.06
	ね じ り	"	"	0.05

さていま ξ , c および n の値を第 4 表に示すごとくとり、 β と $1/\rho$ との関係を図示すると第 3, 4, 5 および 6 図中に示した曲線のごとくなる。図よりこれらの曲線は実験結果とまず一致していると言ってさしつかえなからう。もちろん各個々の実験結果にさらによく適合せしめるためにはこれら定数の値として第 4 表とは異なる数値を与えることも考えられるが、いまの場合実験結果の点が少数なるため確実なることは言えないが、かりに第 4 表のごとく選んでおく。すなわち c はすべての材料に対し $500 \text{ mm}^{-(n-1)}$ とし、 n は極軟鋼および鋳鉄に対しては 2、その他の場合は常に 3 をとることとす。ただしこれらの値に対する十分な吟味は今後の研究結果にまたねばならない。

次に ξ の値につき考えるに (3) 式にて $\xi = 0$ とせ

ば $\beta = 1$ となり、これは材料が切欠に対して最も鈍感なる極限を表わしていると考えられ、また $\xi = \infty$ とせば $\beta = \alpha$ となり、これは切欠に対して最も敏感なる極限を表わしているものと考えられる。したがって一般に ξ は切欠に対する感度を表わす定数といえよう。すなわち定数 c および n の値は主として第 3, 4, 5 および 6 図中における β 曲線の形を規定するのに対し、定数 ξ は β 曲線の高低を決定するものと見なされる。なおいま切欠が極端に鋭く、したがって ρ の非常に小さい場合を考えると (3) 式にて $c\rho^n$ は ρ にくらべて非常に小さくなり無視しうる。したがって切欠が非常に鋭い場合の疲れ試験を行えば c および n の値には無関係に ξ の値は決定される。しかしてこの ξ の値をもって新しい切欠感度定数とすれば、この定数は切欠底部の丸味半径あるいは切欠深さ等には無関係な値となり、材料の切欠に対する感度を表わすのにきわめて好都合であろう。

5. 結 論

従来材料の切欠感度を表わすものとして用いられていた η は切欠形状特に切欠底部丸味半径 ρ によって著しく変化する値である。したがって η をもって切欠感度を表わすときは ρ の幾らのときの値と指定して示されねば無意味である。このことはきわめて不便であるので著者は多数の疲れ試験の結果より切欠係数 β と形状係数 α との関係を求め、それより新しい切欠感度定数として ξ を用いることを提案した。かくすれば切欠感度は切欠の鋭さには無関係な値となりきわめて好都合である。

注：—

(1) 昭和 23 年 11 月 3 日、京阪神臨時大会講演會において講演。

原稿受付 昭和 24 年 6 月 2 日。

(2) 正員、京都大学。

(2) α と β の関係を表わす式として他に、機械學會誌 49 卷 336 頁、161 ページ (昭 21—3, 4, 5) に奥田、河相、村崎氏の

$$\frac{\beta-1}{\alpha-1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{c\rho}}$$

なる式があり、また 小野鑑正博士の

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{1 + \frac{c}{\rho^m}}$$

なる式があるが、前者は (iii) の条件を満足せず、また後者において $m=1/2$ とすれば (iii) の条件は満足するが (iv) の条件を満足しない。